УДК 528:621.315

СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ВІДДАЛІ МІЖ ТОЧКАМИ НА ОСІ ПІДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДУ

Ю.Й. Стрілецький

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76009, тел. (03422)4-60-77

Запропоновано методику підвищення точність побудови просторової моделі підземного трубопроводу з урахуванням глибини його залягання. Описано спосіб вимірювання вертикального зміщення при зборі даних для побудови просторової моделі трубопроводу. Наведено основні математичні залежності, які дають можливість реалізувати запропонований спосіб вимірювання вертикального зміщення.
Ключові слова: підземний трубопровід, просторове положення, вісь, модель, опора, віддаль, лазерний промінь, світлова пляма, інтенсивність освітлення.

Предложено методику повышения точности построения пространственной модели подземного трубопровода с учётом глубины его залегания. Описан способ измерения горизонтального смещения при сборе данных для построения пространственной модели трубопровода. Приведены основные математические зависимости, которые дают возможность реализовать предложенный способ измерения вертикального смещения.
Ключевые слова: подземный трубопровод, пространственное положение, ось, модель, опора, расстояние, лазерный луч, световое пятно, интенсивность освещения.

It is offered a technique increasing accuracy of construction of 3D model of the underground pipeline according of its depth. The way of measurement of horizontal displacement is offered at data gathering for construction of spatial model of the pipeline. The basic mathematical dependences which enable are resulted to realize the offered way of measurement of vertical displacement.
Keywords: underground pipeline, spatial position, ax, model, support, distance, laser ray, light-spot, intensity of illumination.

Важливою причиною відмов та аварій в системі магістральних газопроводів є зміна просторового положення трубопроводів відносно проектного. Саме ці відхилення створюють напружено-деформований стан трубопроводу і є причиною зростання механічних напружень. Рівень напружень стінок магістрального трубопроводу визначає його технічний стан і залишковий ресурс. Для попередження виникнення аварійної ситуації необхідно постійно контролювати положення осі трубопроводу і проводити цей контроль найбільш оперативними методами. Виявити переміщення можна на основі результатів постійного моніторингу положення осі трубопроводу. Визначити положення осі підземного трубопроводу доволі складно, тому доцільно шукати положення окремих точок на його осі і будувати просторову модель трубопроводу розрахунковим шляхом.

Методику побудови просторової моделі трубопроводу за вимірами на поверхні грунту наведено в [1]. Однак трубопровід занурений в грунт і необхідно враховувати глибину його залягання для отримання точніших результатів.

Система, що використовується для вимірювань при побудові просторової моделі трубопроводу, складається із декількох опор, на вершині яких встановлено пристрої для вимірювання віддалі між опорами (рис.1). Висоти опор одинакові і рівні h_o. Віддаль, яку виміряли на поверхні грунту над трубопроводом, буде l. Задачею вимірювання є визначення віддалі між точками, які лежать безпосередньо на трубі $\tilde{l}$. Для цього необхідно врахувати глибину залягання трубопроводу в місцях вимірювання h_1 та h_2.

Розглянемо утворений чотирикутник ABCD (рис.2), однією зі сторін якого є шукана віддаль.

Визначити глибину залягання трубопроводу h_1 та h_2 можна за допомогою трасошукача, висота опори є відомою. Оскільки опори встановлюються вертикально, то сторони чотирикутника AD і BC є паралельними.

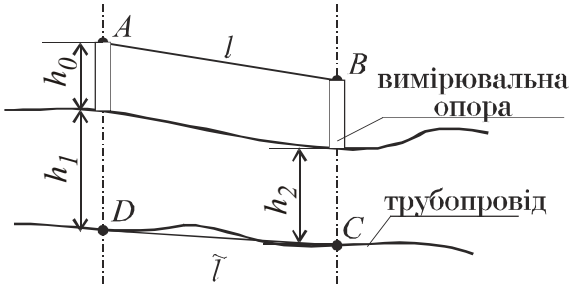


Рисунок 1 – Схема проведення вимірювання віддалей між опорами

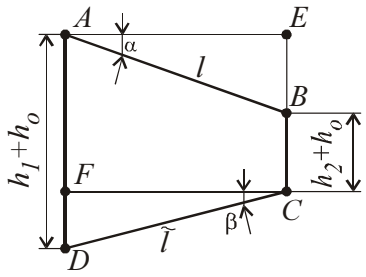


Рисунок 2 – Чотирикутник для пояснення способу вимірювання

Для визначення сторони чотирикутника *DC* за відомими трьома сторонами необхідно виміряти кут α. Маючи значення кута α та віддалі *AB*, *AD* і *BC,* можна визначити сторону *DC* при виконанні таких умов:

$$\begin{aligned} EB &= AB \cdot \sin(\alpha), \\ FC &= AB \cdot \cos(\alpha), \\ FD &= AD - (BC + BE), \\ \beta &= \arctan\left(FD/FC\right), \\ DC &= FC/\cos(\beta). \end{aligned} \qquad (1)$$

Таким чином в польових умовах окрім вимірювання віддалі між вершинами опор необхідно вимірювати ще й кут або вимірювати відразу віддаль по вертикалі між опорами *AE*, а також різницю висот *EB* між вершинами першої і другої опори (рис. 2).

Такі вимірювання можна проводити нівелірами чи тахеометрами. Однак для збільшення продуктивності вимірювання варто скористатися вимірювальною системою, до складу якої входить глибиномір та вимірювач всіх необхідних віддалей та кутів. Вимірювання віддалі та малого кута на місцевості можна провести за допомогою оптичної системи, яка складається із спеціальної системи розгортки лазерного променя та декількох оптичних давачів. Система розгортки коливає промінь лазера відносно середнього положення. Коливання променя створюють на опорі із оптичними давачами світлову пляму із змінною інтенсивністю (рис. 3).

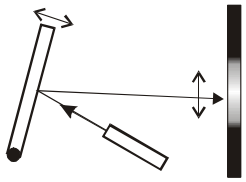


Рисунок 3 – Спосіб формування світлової плями на вимірювальній опорі

Положення цієї плями і її розмір визначатимуть віддаль між системою розгортки і опорою, а також вертикальне зміщення опори відносно системи розгортки.

Якщо представити інтенсивність світлової плями, що утворилася при переміщенні лазерного променя графічно, то, в залежності від будови системи розгортки, отримаємо якісну залежність інтенсивності освітлення *I* від положення *x,* яка показана на рис. 4.

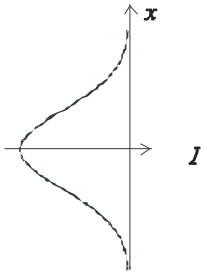


Рисунок 4 – Зміна інтенсивності освітлення змінна по висоті опори

Знаючи залежність, за величиною освітленості можна визначити положення максимуму (рис. 5), а за ним і вертикальне зміщення опори Δh.

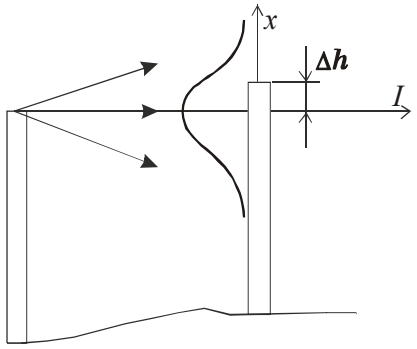


Рисунок 5 – Визначення вертикального зміщення опори за допомогою лазерного променя

Визначивши значення Δh і глибину залягання труби, можна визначити горизонтальне зміщення другої опори відносно першої (значення *EC,* рис. 2).

Зручно виготовити систему розгортки так, щоб промінь переміщався на випадковий кут. Якщо закон зміни кута відповідатиме нормальному, то інтенсивність світлової плями буде також відповідати нормальному закону розподілу (рис. 6).

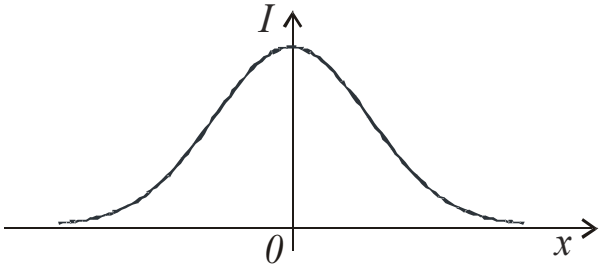


Рисунок 6 – Розподіл інтенсивності освітлення при переміщенні променя на випадковий кут за нормальним законом розподілу

Нормальний закон розподілу випадкової величини описується залежністю:

$$f(x)=\frac{1}{2\pi\sigma}e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \qquad (2)$$

де m – центральний момент, σ – середнє квадратичне відхилення СКВ випадкової величини.

При описі інтенсивності освітлення за допомогою залежності (2) необхідно врахувати зміну залежності від віддалі до системи розгортки та загальної освітленості, що можна зробити наступним чином:

$$f(x)=c+\frac{A}{2\pi\sigma}e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \qquad (3)$$

де c – інтенсивність оточуючого освітлення; A – коефіцієнт, що залежить від якості лазера та параметрів системи вимірювання.

При зміні віддалі до системи розгортки змінюється форма та амплітуда залежності, оскільки інтенсивність освітлення із зміною віддалі розподіляється по більшій площі (рис.7). Віддаль впливатиме на амплітуду A та СКВ σ. Амплітуда не визначальний параметр, оскільки залежить як від віддалі, так і від параметрів перетворювача. Тому для визначення віддалі варто аналізувати СКВ σ. При фіксованих параметрах системи розгортки залежність між віддалю і СКВ σ також буде фіксованою.

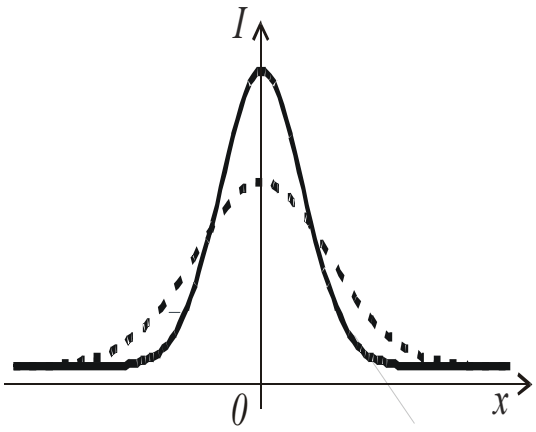


Рисунок 7 – Вплив віддалі між опорами на інтенсивність освітлення

Таким чином, для вимірювання віддалі та вертикального зміщення вимірювальної опори відносно системи розгортки необхідно знайти чотири параметри: c, A, σ, m.

Для спрощення системи варто виключити параметр c на етапі вимірювання, враховуючи, що фізично c являє собою інтенсивність фонового освітлення. Тому можна виміряти інтенсивність освітлення до моменту включення лазерного променя і врахувати її вплив на результат. Таким чином залишиться три параметри, які треба визначити.

Для їх визначення необхідно встановити три оптичних давачі на однаковій віддалі Δ один від одного і виміряти інтенсивність їх освітлення I_1, I_2, I_3 при роботі системи розгортки лазерного променя (рис. 8). Приймемо, що другий оптичний давач знаходиться в початку системи координат.

Всі параметри описуються такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} I_1=\dfrac{A}{2\pi\sigma}e^{-\frac{(\Delta+m)^2}{2\sigma^2}}, \\ I_2=\dfrac{A}{2\pi\sigma}\cdot e^{-\frac{m^2}{2\sigma^2}}, \\ I_3=\dfrac{A}{2\pi\sigma}\cdot e^{-\frac{(\Delta-m)^2}{2\sigma^2}}. \end{cases} \qquad (4)$$

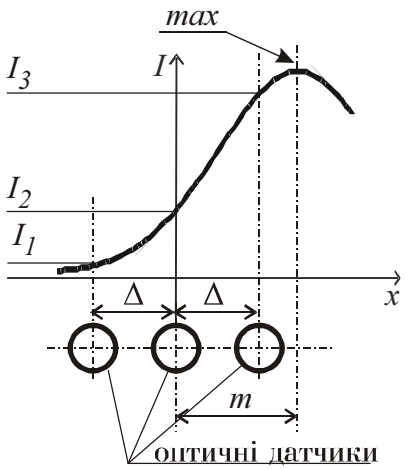


Рисунок 8 – Вимірювання інтенсивності освітлення оптичними датчиками

Враховуючи, що коефіцієнт A залежний від багатьох факторів і для кінцевого результату не розглядається, його можна представити змінною $\tilde{A} = \frac{A}{\pi\sqrt{2}}$, а СКВ σ замінимо на $\tilde{\sigma} = \sqrt{2}\sigma$. Тоді систему рівнянь (4) перепишемо таким чином:

$$\begin{cases} I_1 = \dfrac{\tilde{A}}{\tilde{\sigma}} e^{-\frac{(\Delta+m)^2}{\tilde{\sigma}^2}}, \\ I_2 = \dfrac{\tilde{A}}{\tilde{\sigma}} e^{-\frac{m^2}{\tilde{\sigma}^2}}, \\ I_3 = \dfrac{\tilde{A}}{\tilde{\sigma}} e^{-\frac{(\Delta-m)^2}{\tilde{\sigma}^2}}. \end{cases} \quad (5)$$

Визначивши $\tilde{A}$ з першого та третього рівняння і прирівнявши їх, отримаємо залежність для визначення коефіцієнта m:

$$m = -0{,}25 \ln(I_1/I_3) \frac{\tilde{\sigma}^2}{\Delta}. \quad (6)$$

Скориставшись першим та другим рівняннями, знайдемо залежність для $\tilde{\sigma}$:

$$\tilde{\sigma}^2 = \frac{\Delta^2 + 2\Delta m}{\ln(I_2/I_1)}, \quad (7)$$

звідки

$$m = -\frac{1}{2} \ln(I_1/I_3) \frac{\Delta}{2\ln(I_2/I_1) + \ln(I_1/I_3)}. \quad (8)$$

Таким чином можна визначити віддаль від другого оптичного давача до центральної лінії системи розгортки. Так само можна визначити і значення коефіцієнта $\tilde{\sigma}$, який пропорційний віддалі.

В описані системі вимірювання може використовуватися будь-яке напрямлене джерело освітлення. Система розгортки не потребує точного налагодження. Необхідною умовою є лише відтворення нормального закону розподілу випадкового кута зміщення променя.

ВИСНОВКИ

У поєднанні із вимірювачем глибини залягання трубопроводу запропонована система вимірювання суттєво спрощує процес побудови просторової моделі трубопроводу і дає можливість проводити оперативний контроль положення осі підземних трубопроводів. У свою чергу своєчасне виявлення зміни положення трубопроводу дає можливість попередити аварійну ситуацію, пов'язану із виникненням надлишкових напружень в стінках трубопроводу.

1. Стрілецький Ю. Моніторинг положення осі трубопроводу // Методи та прилади контролю якості. – 2008. – №21. – С. 48-51.

Поступила в редакцію 25.11.2009р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Кісіль І.С.